04

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА С ЗАМЕДЛЕННЫМ ВВОДОМ ЭНЕРГИИ В ГАЗЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, ЗАНИМАЮЩЕГО МАЛЫЙ ОБЪЕМ

© *В.А.Поздеев*

Высоковольтный электрический разряд в среде большой начальной плотности и ограниченной камерой малого объема находит применение как в физических экспериментах по исследованию свойств вещества при высокой температуре и высоком давлении, так и в технологических установках с целью изменения свойств материалов [1]. Импульсные гидродинамические поля давления и параметры плазмы при электрическом разряде в замкнутых объемах жидкости численными методами исследовались в [2,3]. Численное моделирование разряда в цилиндрической камере, заполненной гелием высокого начального давления (100 бар), выполнено в [4,5]. Однако результаты работ [2–5] получены для случаев осесимметричного движения сред. На практике зачастую как электродная система, так и рабочая камера могут иметь сложную геометрию, что усложняет численное моделирование динамики плазмы и среды. Квазистатический подход аналитической оценки параметров плазмы при замедленном вводе энергии разряда в малом замкнутом объеме жидкости использован в работе автора [6]. В настоящей работе впервые получены аналитические выражения для аналитической оценки параметров плазмы высоковольтного разряда с замедленным вводом энергии в газе высокого начального давления и занимающего малый объем.

Рассмотрим камеру малого, но произвольной геометрии объема $V_0$ с высоким начальным давлением $P_0$, где в межэлектродном промежутке развивается плазменный канал текущего объема $V_п(t)$ в результате замедленного ввода энергии по временно́му закону $E(t)$. Время ввода энергии $\tau$ значительно превышает время пробега волны давления до отдаленной стенки камеры и обратно. Вышеизложенное позволяет считать газ в камере с сосредоточенными параметрами. При этом давление газа в любой точке камеры равно давлению плазмы в канале разряда $P_п(t)$. Суммарный объем газа и плазмы в любой момент времени равен объему камеры, что в безразмерном виде записывается следующим образом:

$$\bar{V}_г(t) + \bar{V}_п(t) = 1, \qquad (1)$$

где $\bar{V}_г = V_г/V_0$, $\bar{V}_п = V_п/V_0$. Тогда давление газа в произвольный момент времени, равное давлению плазмы с учетом (1), имеет вид

$$\bar{P}_п(t) - \frac{P_п}{P_0} = \left(1 - \bar{V}_п\right)^{-\varkappa}, \qquad (2)$$

где $\varkappa$ — показатель адиабаты для газа. С другой стороны, давление плазмы в канале разряда и объем плазмы канала связаны уравнением баланса энергии [7]

$$\bar{P}_п \frac{d\bar{V}_п}{dt} + (k-1)^{-1}\frac{d(\bar{P}_п\bar{V}_п)}{dt} = \frac{1}{P_0V_0}\frac{dE}{dt}, \qquad (3)$$

где $k$ — эффективный показатель адиабаты плазмы. Заметим, что в (3) первое слагаемое является выражением работы канала над газом, а второе слагаемое выражает внутреннюю энергию плазмы. Интегрируя почленно выражение (3) с учетом соотношения (2), получаем соотношение вида

$$(k-1)\left[(1-\bar{V}_п)^{1-\varkappa} - 1\right] +$$

$$+ (\varkappa - 1)\bar{V}_п(1-\bar{V}_п)^{-\varkappa} = (\varkappa-1)(k-1)\frac{E}{P_0V_0}. \qquad (4)$$

В общем случае решение уравнения (4) относительно величины $\bar{V}_п(t)$ возможно лишь численно. Однако для некоторых случаев, важных для практики, получим приближенные аналитические решения. Так, в случае выполнения условия $\bar{V}_п \ll 1$ уравнение (4) с точностью до второго порядка малости приводится к виду

$$\bar{V}_п^2 + \frac{2k}{\varkappa(k+1)}\bar{V}_п - \frac{2(k-1)}{\varkappa(k+1)}\frac{E}{P_0V_0} = 0, \qquad (5)$$

решение которого имеет вид

$$\bar{V}_п = \frac{k}{\varkappa(k+1)}\left[\left(1 + \frac{2(k^2-1)\varkappa}{k^2}\frac{E}{P_0V_0}\right)^{1/2} - 1\right]. \qquad (6)$$

А так как в этом случае выполняется условие $E/(P_0V_0) \ll 1$, то решение (6) можно записать в виде

$$\bar{V}_п = \frac{(k-1)E}{k \cdot P_0V_0}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{(k^2-1)\varkappa}{k^2}\frac{E}{P_0V_0}\right). \qquad (7)$$

Теперь, полагая известным закон изменения объема канала разряда (6,7), по выражению (2) или его упрощенному представлению $\bar{P}_п \approx 1 + \varkappa \bar{V}_п + \frac{\varkappa}{2}(\varkappa+1)\bar{V}_п^2$ находим представление для давления в плазме канала

$$\bar{P}_п = 1 + \frac{\varkappa(k-1)}{k}\,\frac{E}{P_0V_0}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{\varkappa}\right)\frac{\varkappa}{k}\,\frac{(k-1)E}{P_0V_0}\right]. \quad (8)$$

Рассмотрим еще один наиболее характерный случай, когда объем плазменного канала практически занимает весь объем камеры [5]. В этом случае решение уравнения (4) будем искать методом последовательных приближений в виде

$$(\bar{V}_п)_n = 1 - \left[\frac{(k-1) + (\varkappa - k)(\bar{V}_п)_{n-1}}{(k-1)\left[1 + (\varkappa-1)E/(P_0V_0)\right]}\right]^{1/\varkappa}, \quad (9)$$

где $n$ — порядковый номер приближения, причем $(\bar{V}_п)_0 = 1$. Принимая во внимание, что $P_0V_0/E \ll 1$, решение второго приближения по (9) имеет вид

$$(\bar{V}_п)_2 = 1 - \left(\frac{P_0V_0}{(k-1)E}\right)^{1/\varkappa}\left[1 - \frac{(\varkappa-k)}{\varkappa(\varkappa-1)}\left(\frac{P_0V_0}{E}\right)^{1/\varkappa}\right] \quad (10)$$

для объема плазменного канала и вид

$$\bar{P}_п = \frac{(k-1)E}{P_0V_0}\left[1 + \frac{(\varkappa-k)}{(\varkappa-1)}\left(\frac{P_0V_0}{E}\right)^{1/\varkappa}\right] \quad (11)$$

для давления плазмы. Заметим, что $\varkappa > k > 1$. Для сравнения приведем без вывода оценку давления плазмы канала при разряде в воде малого объема

$$\bar{P}_п = \frac{P}{An} = \left(2\,\frac{k-1}{k+1}\,\frac{E}{AnV_0}\right)^{1/2} \times$$

$$\times\left[1 + \frac{(n+1)(2k+1)}{6(k+1)}\left(2\,\frac{k-1}{k+1}\,\frac{E}{AnV_0}\right)^{1/2}\right], \quad (12)$$

где $A$, $n$ — постоянные в уравнении состояния воды в форме Тета ($A = 300$ МПа, $n = 7$).

Температуру плазмы $T$ найдем по уравнению состояния идеального газа, которое для частично ионизованной и полностью ионизованной плазмы имеет соответственно вид [8]

$$T = \frac{P_п}{R(1+\alpha)}, \quad (13)$$

где $R$ — универсальная газовая постоянная; $\alpha$ — коэффициент, учитывающий неидеальность плазмы.

Закон ввода энергии $E(t)$ определяется из эксперимента.

## Список литературы

[1] *Глебов И.А., Рутберг Ф.Г.* Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоиздат, 1985. 153 с.

[2] *Ищенко Ж.Н., Поздеев В.А., Семко А.Н., Скрипниченко А.Л., Чуприн А.Н.* // Вести АН БССР. 1985. № 1. С. 11–17.

[3] *Поздеев В.А., Самко А.Н., Чуприн А.Н.* Импульсные гидродинамичекие поля при электрическом разряде в замкнутых объемах жидкости // Препринт ПКБЭ АН УССР. № 15. Николаев, 1990. 37 с.

[4] *Андреев Д.А., Богомаз А.А., Рутберг Ф.Г., Шакиров А.Н.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. В. 6. С. 74–82.

[5] *Дубовенко К.А.* // ЖТФ. 1992. Т. 2. В. 6. С. 83–93.

[6] *Поздеев В.А.* Нестационарные волновые поля в областях с подвижными границами. Киев: Наук. думка, 1992. 244 с.

[7] *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 151 с.

[8] *Крутов В.И.* и др. Техническая термодинамика. М.: Высш. школа, 1991. 384 с.

Поступило в Редакцию
21 марта 1996 г.